

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТРУНІНА ГАННА ОЛЕКСІЇВНА



УДК 621.316

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В
РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМ
ГЕНЕРУВАННЯМ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Яндульський Олександр Станіславович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
декан факультету електроенерготехніки та автоматики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій та систем;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Сабарно Людмила Ростиславівна
Інститут електродинаміки НАН України,
старший науковий співробітник відділу
оптимізації систем електропостачання.

Захист відбудеться « 9 » квітня 2019 р. о 17⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради K26.002.06 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. №20, ауд.3.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « 4 » березня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.О. Шостак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в складі електричних мереж (ЕМ) України визначає необхідність подальшого удосконалення методів та засобів керування нормальними режимами ЕМ. Попри переваг, які супроводжують інтеграцію джерел розосередженого генерування (ДРГ) в енергосистему, підключення таких джерел до розподільних електричних мереж (РЕМ) суттєво впливає на втрати потужності, напругу в електричній мережі, а також роботу релейного захисту та автоматики. При цьому коливання напруги та порушення її допустимих меж через підключення ДРГ зумовлює необхідність дослідження існуючих та розробки нових методів регулювання напруги.

Значний вклад в розвиток підходів та методів керування нормальними режимами ЕМ за наявності ДРГ внесли колективи Інституту електродинаміки та Відновлюваної енергетики НАН України, Вінницького та Донецького Національних технічних університетів, Національного університету «Львівська політехніка», Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» та колективи закордонних фірм і дослідних установ Канади, США, країн Європейського союзу, Російської Федерації, серед яких EPRI, ERCOT, CIGRE та Сибірський науково дослідний інститут.

Згідно з концепцією приєднання ДРГ до РЕМ особлива увага приділяється напрузі у вузлі підключення джерела, яку при генеруванні потужності ДРГ необхідно підтримувати в допустимих межах. Але з часом в РЕМ можливі відключення частки навантаження або зміна конфігурації мережі, що може викликати порушення допустимих меж по напрузі, що, у свою чергу, може призвести до вимушеного обмеження активної потужності генерування ДРГ. У той же час, аналіз проблем, що виникають при керуванні нормальними режимами РЕМ з ДРГ показав, що застосування існуючих підходів та методів регулювання напруги має ряд недоліків, серед яких слід відзначити: підвищення втрат потужності в РЕМ та зменшення терміну експлуатації засобів регулювання напруги.

Таким чином, актуальною стає задача розвитку існуючих та розробки нових підходів та методів оптимального керування нормальними режимами РЕМ з ДРГ на основі координування роботи різнотипних засобів регулювання напруги з врахуванням змінного характеру потужності генерування ДРГ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана на кафедрі автоматизації енергосистем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у відповідності з планами наукових досліджень, а саме, за держбюджетною науково-дослідною роботою «Наукові засади, підходи та методи підвищення ефективності автоматичного регулювання режимами електроенергетичної системи з відновлювальними джерелами енергії» (№ державної реєстрації 0111U002229), де здобувач була виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в підвищенні ефективності регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелами розосередженого генерування шляхом координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги в умовах змінного генерування ДРГ.

Відповідно до вказаної мети в роботі вирішуються такі **основні задачі**:

1. Провести аналіз методів регулювання напруги в мережах 110/35/10 кВ за наявності ДРГ та дослідити їх роботу у складі РЕМ при змінному характері генерування потужності.

2. Сформулювати критерій оптимального регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, з використанням якого розробити систему координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги в РЕМ при роботі ДРГ в режимі регулювання напруги та коефіцієнта потужності.

3. Розробити метод визначення складу засобів регулювання напруги, залучених до координованого керування.

4. Перевірити ефективність роботи розробленої системи координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги в РЕМ з ДРГ та ефективність застосування розробленого методу визначення складу засобів регулювання напруги, залучених до координованого керування.

5. Сформулювати вимоги до інформаційного забезпечення розробленої системи координованого регулювання напруги в РЕМ з ДРГ.

Об'єктом дослідження є процеси в розподільних електричних мережах з джерелами розосередженого генерування.

Предметом дослідження є методи та засоби регулювання напруги в розподільних електричних мережах з джерелами розосередженого генерування.

Методи дослідження. В дисертації для розв'язання поставлених задач використані методи математичного моделювання, чисельні методи та елементи теорії чутливості. Для пошуку оптимального розв'язку поставлених задач використано метод штрафних функцій та методи лінійного програмування. При цьому використано методи матричної алгебри та синтезу оптимальних регуляторів. Визначення місць встановлення ДРГ здійснювалось на основі методу «Багатокритеріального показника». Для розроблення системи керування різнотипними засобами регулювання напруги використано елементи теорії автоматичного керування. Перевірка ефективності розроблених методів та алгоритмів проводилася на основі аналізу результатів моделювання на сертифікованих програмних комплексах розрахунку режимів РЕМ. Режими РЕМ розраховувались на базі методу Ньютона-Рафсона.

Наукову новизну складають такі положення:

1. Розвинуто підхід до регулювання напруги в РЕМ з ДРГ на основі використання різнотипних засобів регулювання напруги, що на відміну від існуючих дає можливість ефективно залучати ДРГ до регулювання напруги, що дозволяє зменшити негативний вплив ДРГ на напругу у вузлах РЕМ.

2. Сформовано новий критерій оптимального регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, що на відміну від існуючих дозволяє на основі методів лінійного програмування здійснити пошук оптимальних значень активної та реактивної

потужності ДРГ, СТК та положень систем регулювання під навантаженням (РПН) трансформаторів, що функціонують в складі системи координованого керування.

3. Розроблено метод координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, що на відміну від існуючих враховує вплив засобів регулювання на втрати потужності в мережі, що дозволяє підвищити ефективність роботи РЕМ з умовно-керованими ДРГ.

4. Отримав подальшого розвитку метод визначення складу обладнання системи координованого керування, який на відміну від існуючих враховує чутливість по напрузі вузлів мережі відносно зміни положення систем РПН трансформаторів, що дозволяє зменшити кількість спрацювань системи РПН під час регулювання напруги в РЕМ в умовах змінного генерування ДРГ.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що:

1. Застосування запропонованого критерію оптимального регулювання напруги в РЕМ з ДРГ та системи координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги, розробленої з його використанням, дозволило максимізувати вихідну активну потужність генерування ДРГ при мінімальних втратах потужності в мережі.

2. Розроблений метод визначення складу обладнання системи координованого керування дозволяє мінімізувати сумарну кількість спрацювань систем РПН трансформаторів під час регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, що мають змінний характер генерування потужності.

3. Результати проведених досліджень дозволили сформулювати вимоги до інформаційного забезпечення розробленої системи координованого регулювання напруги в РЕМ з ДРГ.

Окремі результати дослідження увійшли в звіт науково-дослідної роботи: «Наукові засади, підходи та методи підвищення ефективності автоматичного регулювання режимами електроенергетичної системи з відновлювальними джерелами енергії» (№ ДР 0111U002229), виконаної на кафедрі АЕ ФЕА КПІ ім.Ігоря Сікорського. Отримані рішення можуть стати основою для створення нових методів регулювання напруги в РЕМ з врахуванням змінного характеру генерування ДРГ.

Результати, отримані в дисертації, використовуються в навчальному процесі та при виконанні кваліфікаційних та науково-дослідних робіт магістрантів кафедри АЕ ФЕА КПІ ім.Ігоря Сікорського.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить формалізація поставлених завдань, розробка математичних моделей і методів, їх реалізація і тестування в програмно-обчислювальних комплексах, аналіз та узагальнення результатів, а саме: [1] – дослідження роботи батарей статичних конденсаторів (БСК) у складі електричної мережі, розробка імітаційної моделі регулятора напруги з використанням тиристорно-комутованих БСК; [2] – аналіз підходів до оптимального керування режимами РЕМ з ДРГ, формування критерію

оптимального регулювання напруги, що враховує погіршення якості електроенергії через відхилення напруги в мережі; [3] – розробка підходу до визначення зон ефективного регулювання напруги джерелами розосередженого генерування з інверторним приєднанням в РЕМ на основі розрахунку і аналізу коефіцієнтів чутливості вузлів по напрузі; [4] – дослідження впливу зміни положення системи РПН трансформаторів на коефіцієнти чутливості в вузлах РЕМ по напрузі відносно зміни потужності ДРГ; [5] – формування критеріїв оптимального регулювання напруги в РЕМ з ДРГ у випадках їх належності одному або різним власникам з урахуванням особливостей регулювання напруги за допомогою ДРГ та системи РПН трансформатора; [6] – аналіз режимів енергосистеми на основі даних систем моніторингу перехідних режимів (СМІР); [7] – розробка підходу до координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги, що базується на визначенні коефіцієнтів чутливості напруги у вузлах ЕМ відносно зміни реактивної потужності засобів регулювання, що входять до складу системи керування; [8] – дослідження роботи системи РПН трансформатора в РЕМ з ДРГ, розробка системи координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги, формування моделі регулятора положення системи РПН трансформатора; [9] – розробка системи координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги з залученням ДРГ, які мають здатність регулювати напругу в вузлі підключення.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідалися та обговорювалися на Всеукраїнській науковій конференції «Підвищення ефективності роботи електричних мереж» (м. Чернігів, 2013 р.); на II Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2013)» (м. Вінниця, 2013 р.); на XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки (ПСЕ-2014)» (м. Київ, 2014 р.); на V Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк, 2014 р.); на XV Ювілейній Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика XXI століття» (Київ, 2014 р.); на всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (Маріуполь, 2015); на XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2015 р.); на IV Міжнародній конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'15» (Київ, 2015 р.); на III Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками - ОКЕУ 2015» (Вінниця, 2015); на XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2016 р.); на XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2017 р.); на IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками - ОКЕУ 2017» (Вінниця, 2017); на XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (Київ, 2018 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 24 наукові праці, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях України (з них 3 статті у виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз), 13 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій та 2 статті в інших виданнях.

Обсяг та структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (134 найменування) і додатків. Основний зміст викладений на 157 сторінках друкованого тексту, містить 19 таблиць, 62 рисунка. Загальний обсяг дисертації – 216 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, вказано методи дослідження, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості про апробацію отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, вказано особистий внесок здобувача та публікації основних результатів дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз підходів та методів регулювання напруги в РЕМ з ДРГ. Приведено класифікацію ДРГ за ступенем керованості та типом виконання генератора. Визначено, що використання джерел на основі ВДЕ ґрунтується на необхідності підвищення надійності і якості енергопостачання при зменшенні забруднення навколишнього середовища та витрат на вироблення, передачу й розподіл електроенергії. Проведено аналіз проблем, що виникають в РЕМ при підключенні умовно-керованих ДРГ на основі ВДЕ, серед яких порушення допустимих меж по напрузі у вузлах мережі, неконтрольована зміна перетоків потужності в РЕМ та збільшення втрат потужності в мережі. Встановлено, що обмеження вихідної активної потужності ДРГ обумовлено порушенням допустимих меж по напрузі у вузлах мережі.

На основі проведеного аналізу вимог до роботи ДРГ встановлено, що такі джерела повинні бути оснащеними засобами регулювання напруги або самостійно здійснювати регулювання напруги в вузлі підключення, забезпечуючи нормативні параметри якості електроенергії. Аналіз вимог до підключення та функціонування ДРГ показав, що при регулюванні напруги самим ДРГ у вузлі підключення вихідна активна потужність генерування ДРГ повинна зменшуватись на мінімально можливу величину. Але в більшості випадків через зміну конфігурації або складу навантаження мережі, вказані вимоги не можуть бути виконані. При цьому власник ДРГ вимушений обмежувати вихідну активну потужність генерування ДРГ або збільшувати керуючий вплив на засоби регулювання напруги.

Встановлено, що існуючі підходи та методи регулювання напруги в РЕМ з ДРГ можуть призводити до підвищення втрат потужності в РЕМ та зменшення терміну експлуатації засобів регулювання напруги. Аналіз виявлених недоліків показав необхідність підвищення ефективності регулювання напруги в РЕМ з ДРГ шляхом координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги з залученням РПН трансформаторів, засобів компенсації реактивної потужності та ДРГ. Для цього необхідно розробити метод оптимального

керування різнотипними засобами регулювання напруги в умовах змінного генерування ДРГ. Координована робота різнотипних засобів регулювання дозволить підвищити ефективність регулювання напруги, зменшуючи недоліки окремо взятих підходів. Критерій оптимального регулювання повинен забезпечувати: роботу ДРГ в режимі максимальної активної потужності генерування при нормованих значеннях напруги, мінімум економічних витрат на експлуатацію засобів регулювання напруги та мінімум втрат активної потужності в мережі.

У **другому розділі** на основі досліджень властивостей елементів РЕМ, розроблено математичні моделі, алгоритми роботи та структурні схеми підсистем керування потужністю ДРГ (рис.1), реактивною потужністю СТК (рис.2) та систем керування РПН трансформаторів. В якості ДРГ розглядається сонячна електростанція (СЕС).

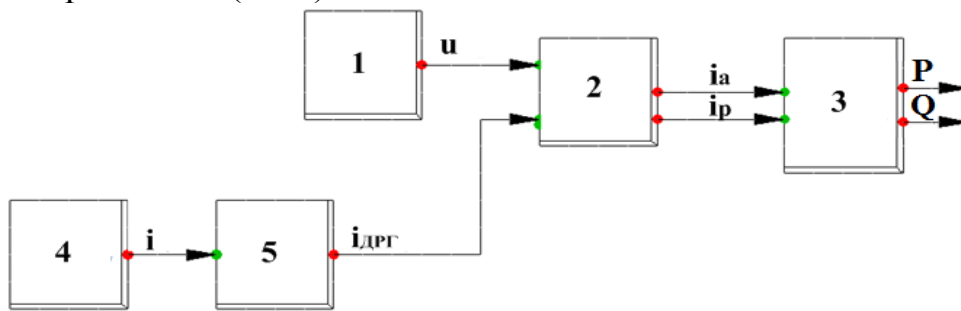


Рис.1. Структурна схема підсистеми керування потужністю ДРГ в режимі регулювання: напруги/коефіцієнта потужності:

1 - датчик напруги в вузлі підключення ДРГ; 2 - блок регулювання напруги/коефіцієнта потужності; 3 - ДРГ; 4 – блок синусоїдального сигналу; 5 - блок імітування генерування ДРГ

Приріст активної та реактивної складової вихідного струму ДРГ, що працює в режимі регулювання коефіцієнта потужності або напруги визначається через поправку змінної стану:

$$\Delta x_{i+1} = \begin{cases} -T, & u > u_{\text{ном}} + \Delta u \\ i_{\text{ДРГ}} + 0.1 - x_i, & x_i > i_{\text{ДРГ}} + 0.1 \\ T, & (x_i < i_{\text{ДРГ}} - 0.1) \text{ and } (u < u_{\text{ном}} + \Delta u / 2), \\ 0 & \end{cases} \quad x_{i+1} = x_i + \Delta x_{i+1}, \quad (1)$$

при цьому активна та реактивна складова струму ДРГ, яке працює в режимі регулювання коефіцієнта потужності визначається як:

$$i_a = \begin{cases} x_{i+1} \cdot \cos \varphi, & x_{i+1} \geq 0 \\ 0, & x_{i+1} < 0 \end{cases}, \quad i_p = \begin{cases} x_{i+1} \cdot \sin(\arccos(\cos \varphi)), & x_{i+1} \geq 0 \\ 0, & x_{i+1} < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

а при роботі ДРГ в режимі регулювання напруги активна складова струму ДРГ визначається:

$$i_a = \begin{cases} x_{i+1}, & x_{i+1} \geq 0 \\ 0, & x_{i+1} < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

де: Δx_{i+1} – поправка змінної стану x_i ; x_i , x_{i+1} – змінні стану; T – постійна часу; u – сигнал напруги у вузлі підключення ДРГ; $u_{\text{ном}}$ – номінальна напруга; Δu – відхилення напруги; $i_{\text{ДРГ}}$ – сигнал вхідного струму; i_a – активна складова

вихідного струму; i_p – реактивна складова вихідного струму; $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності.

В підсистемі керування ДРГ (рис.1) для вимірювання значень напруги використовується блок 1. Блоки 4 і 5 формують сигнал відповідно з типовою зміною вихідної потужності генерування ДРГ. Блок 1 ідентифікує значення напруги в вузлі підключення ДРГ та передає цю інформацію на блок регулювання 2, після чого на вхід ДРГ (блок 3) подаються керуючі сигнали на зміну активного (якщо ДРГ працює в режимі регулювання коефіцієнта потужності) та реактивного струму (в обох режимах регулювання ДРГ). Таким чином, змінюється вихідна активна та реактивна потужності ДРГ.

Підсистема керування реактивною потужністю СТК (рис.2) працює таким чином, що для регулювання напруги в конкретних вузлах РЕМ обирається той СТК, зміна реактивної потужності якого має найбільший вплив на напругу в цих вузлах. Визначення «пріоритетності» СТК виконується на основі чутливості вузлів РЕМ по напрузі відносно зміни реактивної потужності СТК.

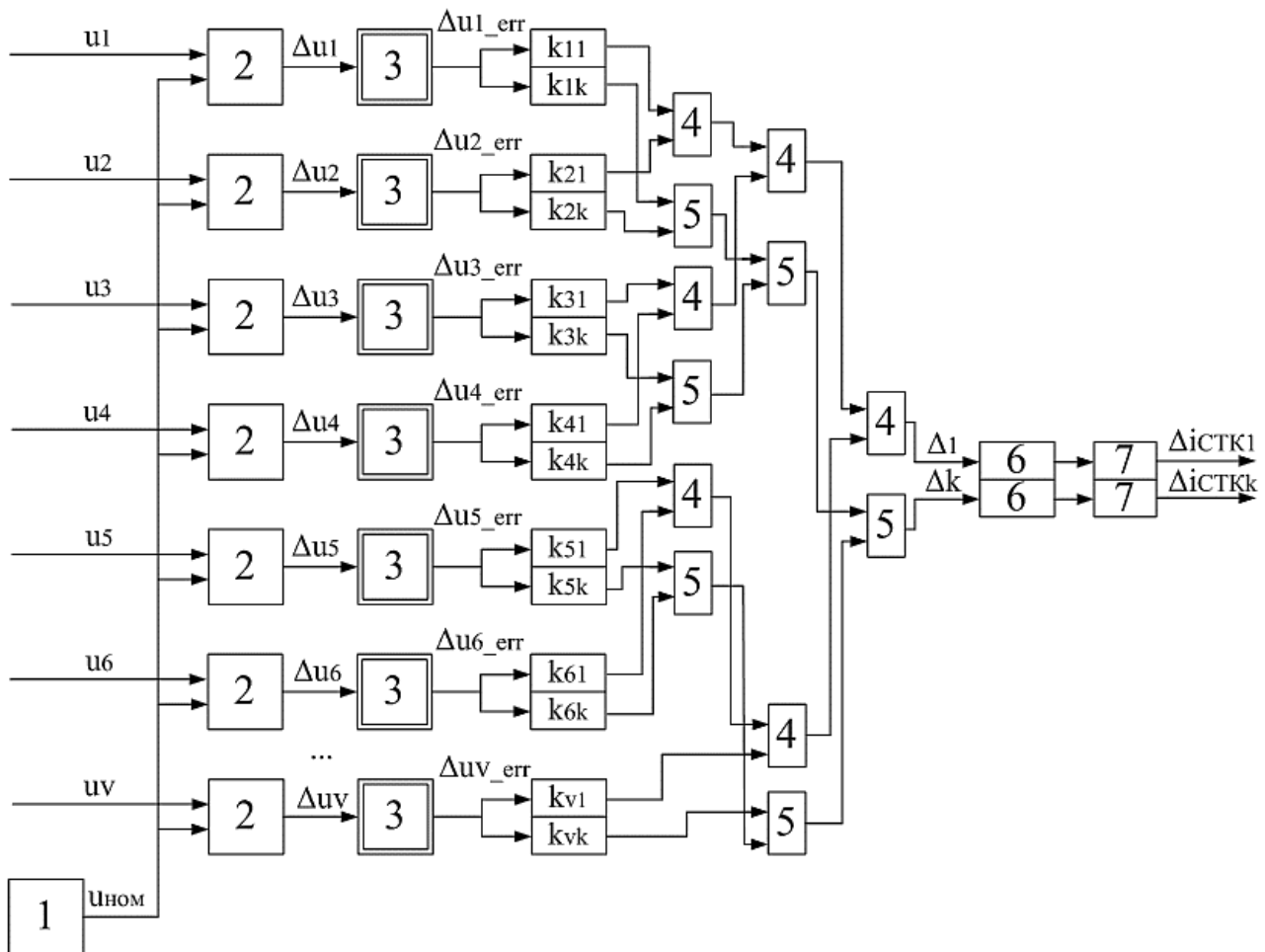


Рис.2. Структурна схема підсистеми регулювання реактивної потужності СТК:
 1 – уставка по напрузі; 2 – блоки визначення відхилення напруги у вузлах від уставки по напрузі; 3 – блоки визначення порушень допустимих границь по напрузі; k_{11}, \dots, k_{vk} – блоки визначення «пріоритетності» регулювання СТК;
 4, 5 – логічні елементи, що визначають максимальне значення серед k отриманих сигналів; 6 – блок інтегратора з обмеженням сигналу; 7 – фільтр вихідного сигналу

В блоці 3 визначається відхилення напруги у вузлі РЕМ:

$$\Delta u_{v_err} = \begin{cases} \Delta u_v - \Delta u_{db}, & \Delta u_v > \Delta u_{db} \\ \Delta u_v + \Delta u_{db}, & \Delta u_v < -\Delta u_{db} \\ 0 & \end{cases} \quad (4)$$

В блоках 6 та 7 формується реактивна складова вихідного струму:

$$\Delta i_{CTKk} = \begin{cases} 0, & (i_{CTKk} \geq i_{maxk}) \text{ and } (\max\{k_k \cdot \Delta u_{v_err}\} > 0) \\ 0, & (i_{CTKk} \leq i_{min k}) \text{ and } (\max\{k_k \cdot \Delta u_{v_err}\} < 0) \\ \max\{k_k \cdot \Delta u_{v_err}\} & \end{cases} \quad (5)$$

де: Δi_{CTKk} – реактивна складова вихідного струму k -го СТК; $u_1 \dots u_v$ – сигнали напруг у вузлах РЕМ; Δu_v – різниця напруг: номінальної та напруги в v -му вузлі РЕМ; Δu_{db} – задана уставка напруги; i_{maxk} , $i_{min k}$ – максимальна та мінімальна реактивна складова струму k -го СТК; k_k – коефіцієнт підсилення, який враховує міру впливу конкретного СТК на напругу в даному вузлі мережі.

В блоках 2 та 3 визначається наявність порушень допустимих меж по напрузі (4) і, якщо такі порушення є, з 3 передаються сигнали $\Delta u_{1_err} \dots \Delta u_{v_err}$ на блоки визначення «пріоритетності» регулювання СТК, після чого поступають на логічні елементи 4, 5, що визначають максимальне значення серед отриманих сигналів $\max\{k_k \cdot \Delta u_{v_err}\}$. Таким чином, визначається, яким саме СТК слід здійснювати регулювання. В блоках 6, 7 перевіряється, чи має визначений СТК запас діапазону регулювання реактивної потужності, після чого формується сигнал зміни реактивної потужності СТК – Δi_{CTK1} або Δi_{CTKk} . У випадку відсутності сигналу про наявність запасу реактивної потужності регулювання СТК не здійснюється.

За результатами аналізу топології розподільних мереж енергосистеми України визначено узагальнену структурну схему мережі та вибрано для подальших досліджень типовий фрагмент РЕМ радіального типу напругою 110/35/10 кВ на прикладі РЕМ Молочанського району Запорізької області.

Проведено дослідження впливу ДРГ на роботу РПН трансформаторів та напругу у вузлах РЕМ. Встановлено, що підключення ДРГ до РЕМ збільшує сумарну кількість спрацювань систем РПН трансформаторів в 2 рази та призводить до порушення допустимих меж по напрузі в контрольних вузлах. Аналіз результатів проведених досліджень показав, що залучення ДРГ до регулювання напруги дозволяє зменшити сумарну кількість перемикань положення систем РПН трансформаторів на 30-50%. Встановлено, що при роботі ДРГ в режимі регулювання напруги сумарна вироблена енергія ДРГ зменшується на 4 %, сумарні втрати активної енергії зменшуються на 9 %. При роботі ДРГ в режимі регулювання коефіцієнта потужності сумарна вироблена енергія ДРГ зменшується на 8 %, сумарні втрати активної енергії збільшуються на 8%.

Результати дослідження впливу ДРГ на РЕМ обумовлюють необхідність поєднання регулювання потужності ДРГ, роботи РПН трансформаторів та інших засобів регулювання напруги, таких як СТК.

У третьому розділі сформовано критерій оптимального регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, який мінімізує втрати потужності в мережі та кількість перемикачів положення систем РПН трансформаторів при максимізації вихідної активної потужності ДРГ, а саме:

$$C_1 \cdot \sum_{g=1}^G \Delta P_{\text{ДРГ}g} - C_2 \cdot \left(\sum_{g=1}^G (\Delta Q_{\text{ДРГ}g}^+ \cdot \frac{\partial P_{\text{lossДРГ}g}}{\partial Q_{\text{ДРГ}g}} + \Delta Q_{\text{ДРГ}g}^- \cdot \frac{\partial P_{\text{lossДРГ}g}}{\partial Q_{\text{ДРГ}g}}) + \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^K (\Delta Q_{\text{СТК}k}^+ \cdot \frac{\partial P_{\text{lossСТК}k}}{\partial Q_{\text{СТК}k}} + \Delta Q_{\text{СТК}k}^- \cdot \frac{\partial P_{\text{lossСТК}k}}{\partial Q_{\text{СТК}k}}) \right) - \\ - C_3 \cdot \sum_{n=1}^N (\Delta N_{\text{РПН}n}^+ + \Delta N_{\text{РПН}n}^-) \rightarrow \max \quad (6)$$

при обмеженнях:

$$0 \leq \Delta P_{\text{ДРГ}g} \leq \Delta P_{\text{ДРГ}g}^{\max} - \frac{\Delta P_{\text{ДРГ}g}^{\max}}{\Delta Q_{\text{ДРГ}g}^{\max+}} \cdot \Delta Q_{\text{ДРГ}g}^+, \quad Q_{\text{СТК}k} + \Delta Q_{\text{СТК}k}^+ \leq Q_{\text{СТК}k}^{\max}, \\ 0 \leq \Delta P_{\text{ДРГ}g} \leq \Delta P_{\text{ДРГ}g}^{\max} - \frac{\Delta P_{\text{ДРГ}g}^{\max}}{\Delta Q_{\text{ДРГ}g}^{\max-}} \cdot \Delta Q_{\text{ДРГ}g}^-, \quad Q_{\text{СТК}k} - \Delta Q_{\text{СТК}k}^- \leq Q_{\text{СТК}k}^{\min}, \\ 0 \leq \Delta N_{\text{РПН}n}^{+/-} \leq \Delta N_{\text{РПН}n}^{+/-\max}, \quad (7) \\ U_{\min} \leq U_v + \sum_{g=1}^G (\Delta P_{\text{ДРГ}g} \cdot \frac{\partial U_v}{\partial P_{\text{ДРГ}g}} + (\Delta Q_{\text{ДРГ}g}^+ - \Delta Q_{\text{ДРГ}g}^-) \cdot \frac{\partial U_v}{\partial Q_{\text{ДРГ}g}}) + \\ + \sum_{k=1}^K \frac{\partial U_v}{\partial Q_{\text{СТК}k}} \cdot (\Delta Q_{\text{СТК}k}^+ - \Delta Q_{\text{СТК}k}^-) + \sum_{n=1}^N \frac{\partial U_v}{\partial N_{\text{РПН}n}} \cdot (\Delta N_{\text{РПН}n}^- - \Delta N_{\text{РПН}n}^+) \leq U_{\max},$$

де: C_1, C_2, C_3 – вагові коефіцієнти, які розраховуються на основі тарифу на електроенергію для g -го ДРГ, вартості втрат потужності для РЕМ та вартості одного перемикачів положення РПН трансформатора, відповідно; $P_{\text{ДРГ}g}, Q_{\text{ДРГ}g}$ – активна та реактивна потужність g -го ДРГ; $\Delta P_{\text{ДРГ}g}$ – значення, на яке можливо збільшити активну потужність g -го ДРГ, завдяки регулюванню напруги; $P_{\text{ДРГ}g}^{\max}, Q_{\text{ДРГ}g}^{\max}$ – максимальна активна та реактивна потужність g -го ДРГ; $\Delta P_{\text{ДРГ}g}^{\max}, \Delta Q_{\text{ДРГ}g}^{\max}$ – максимальне значення активної та реактивної потужності, на яку можливо змінити поточну потужність g -го ДРГ; $\Delta Q_{\text{ДРГ}g}^+, \Delta Q_{\text{ДРГ}g}^-$ – значення, на яке необхідно змінити реактивну потужність g -го ДРГ; $Q_{\text{ДРГ}g}^{\min}$ – мінімальна реактивна потужність g -го ДРГ; $Q_{\text{СТК}k}$ – реактивна потужність k -го СТК; $\Delta Q_{\text{СТК}k}^+, \Delta Q_{\text{СТК}k}^-$ – значення, на яке необхідно змінити реактивну потужність k -го СТК; $Q_{\text{СТК}k}^{\max}, Q_{\text{СТК}k}^{\min}$ – максимальна та мінімальна реактивна потужність k -го СТК; $\Delta N_{\text{РПН}n}^+, \Delta N_{\text{РПН}n}^-$ – кількість перемикачів системи РПН n -го трансформатора; $\Delta N_{\text{РПН}n}^{+/-\max}$ – максимальна допустима кількість перемикачів системи РПН n -го трансформатора за проміжок часу, що розглядається;

$\frac{\partial P_{\text{lossДРГg}}}{\partial Q_{\text{ДРГg}}}$, $\frac{\partial P_{\text{lossСТКk}}}{\partial Q_{\text{СТКk}}}$ – коефіцієнти чутливості втрат потужності в мережі відносно зміни реактивної потужності g-го ДРГ та k-го СТК, відповідно; U_v – значення напруги в v-му вузлі; $\frac{\partial U_v}{\partial P_{\text{ДРГg}}}$, $\frac{\partial U_v}{\partial Q_{\text{ДРГg}}}$ – коефіцієнт чутливості напруги в v-му вузлі відносно зміни активної та реактивної потужності g-го ДРГ, відповідно; $\frac{\partial U_v}{\partial Q_{\text{СТКk}}}$ – коефіцієнт чутливості напруги в v-му вузлі відносно зміни реактивної потужності k-го СТК; $\frac{\partial U_v}{\partial N_{\text{РПНn}}}$ – коефіцієнт чутливості напруги в v-му вузлі відносно зміни положення системи РПН n-го трансформатора.

У відповідності з сформованим критерієм оптимального регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, розроблено метод координованого керування, на основі якого розроблено систему координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги, до якої залучено системи РПН трансформаторів, СТК та ДРГ.

Структурну схему системи координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги в РЕМ з ДРГ наведено на рис.3, де: $U_{\text{ДРГ1}}, U_{\text{ДРГg}}$ – напруги у вузлах підключення ДРГ; $U_{\text{РПН1}}, U_{\text{РПНn}}$ – напруги у вузлах на нижній стороні трансформаторів з РПН; $N_{\text{РПН1}}, N_{\text{РПНn}}$ – положення РПН трансформаторів; $\Delta U_{\text{РПН1}}, \Delta U_{\text{РПНn}}$ – різниця між поточним значенням напруги на низькій стороні трансформатора та номінальним значенням напруги; $\Delta 11, \Delta 1k, \dots \Delta v1, \Delta vk$ – величини, розраховані з використанням коефіцієнтів налаштування СТК, що визначають міру впливу СТК на напруги в вузлах РЕМ.

Узгодження роботи різнотипних засобів регулювання здійснюється на основі аналізу відхилення напруги у вузлах РЕМ. У випадку порушень допустимих меж по напрузі формуються керуючі сигнали, що передаються на ДРГ, РПН трансформаторів та СТК. При цьому, на основі заздалегідь визначених коефіцієнтів налаштувань СТК (8), визначається яким саме пристроєм слід регулювати напругу в конкретному вузлі РЕМ. Коефіцієнти налаштування для розробленої системи керування визначаються на основі аналізу чутливості по напрузі в вузлах та по втратах потужності в мережі відносно зміни потужності СТК:

$$k_{vk\text{СТКk}} = M \cdot \frac{\partial U_v}{\partial Q_{\text{СТКk}}} / \frac{\partial P_{\text{lossСТКk}}}{\partial Q_{\text{СТКk}}}, \quad (8)$$

де: $k_{vk\text{СТКk}}$ – коефіцієнт налаштування системи керування СТК (k – номер СТК; v – номер вузла); M – нормувальна постійна [МВт/в.о. напруги].

Для аналізу ефективності розробленого підходу проведено дослідження роботи системи координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги у вихідних умовах, які представлено в табл.1.

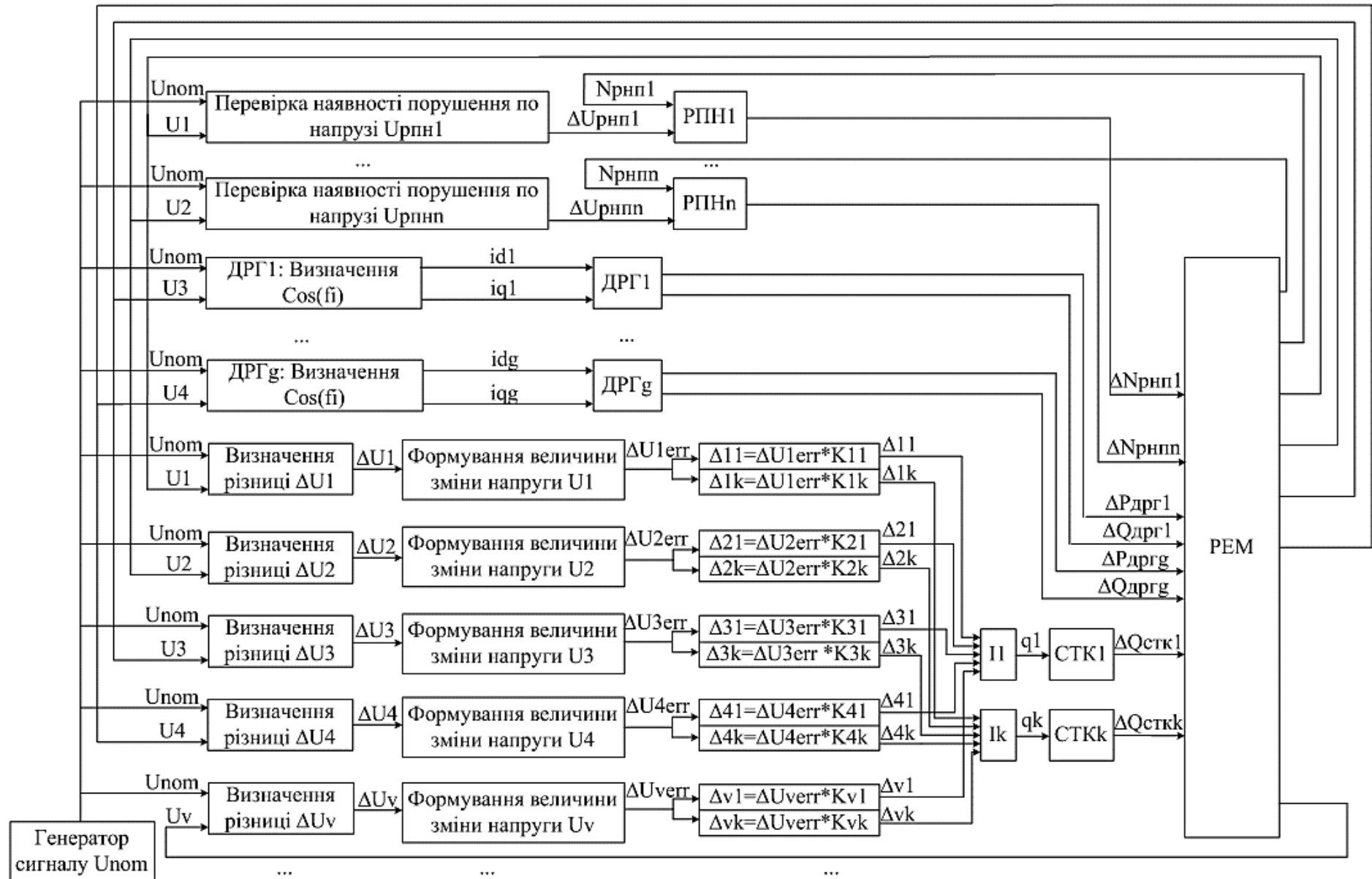


Рис.3. Структурна схема системи координованого керування засобами регулювання в РЕМ з ДРГ

Таблиця 1 – Умови для дослідження роботи системи керування

№ Дослід	Координована робота засобів регулювання	Режим регулювання ДРГ	Використання коефіцієнтів налаштування
1	-	-	-
2	-	регулювання напруги	-
3	+	регулювання напруги	-
4	+	регулювання напруги	+
5	-	регулювання $\cos\varphi$	-
6	+	регулювання $\cos\varphi$	-
7	+	регулювання $\cos\varphi$	+

Дослідження проводились за наявності двох ДРГ потужністю по 15 МВА та двох СТК потужністю по ± 10 МВар. При дослідженнях враховано добові зміни навантаження мережі. Регулювання здійснювалось для усталеного режиму роботи РЕМ. Коефіцієнти налаштування розробленої системи керування визначаються з періодичністю, що відповідає максимальній частоті зміни вихідної потужності генерування ДРГ.

Порівняльна характеристика отриманих сумарних втрат активної енергії в мережі та виробленої енергії ДРГ при різних вихідних умовах досліджень наведена на рис.4, а сумарна кількість перемикачів положення систем РПН трансформаторів приведена на рис.5.

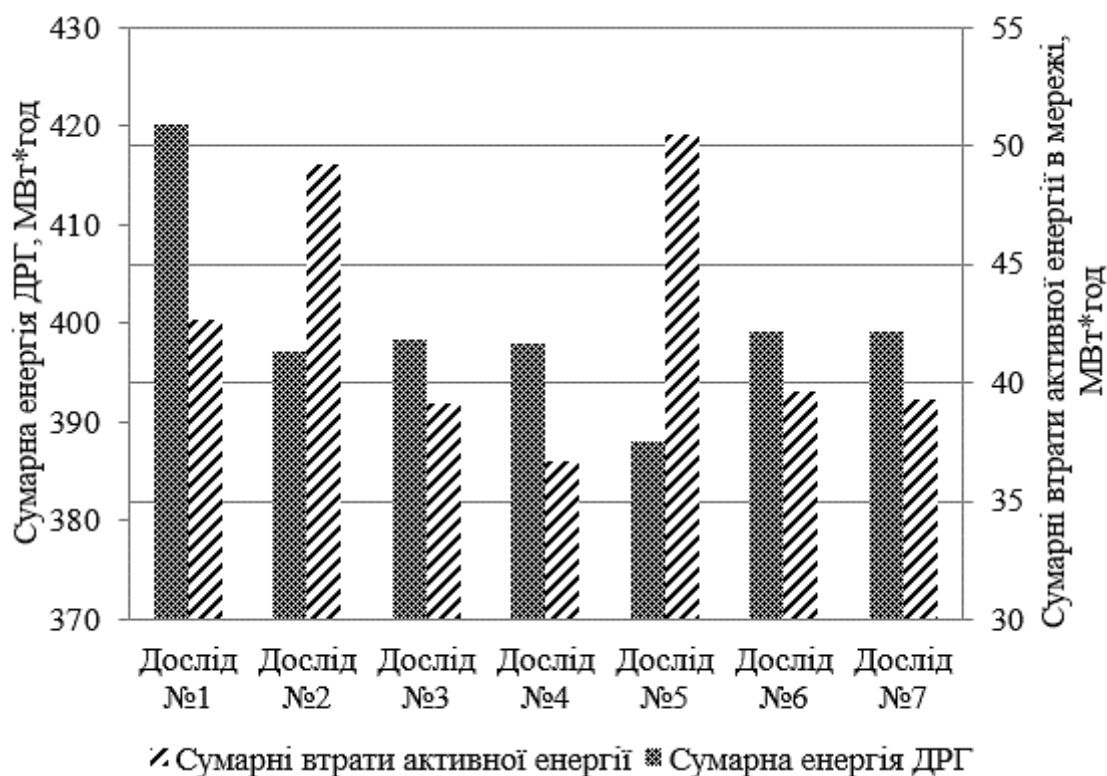


Рис.4. Сумарні енергія ДРГ та втрати активної енергії в РЕМ, МВт*год

Аналіз результатів досліджень показав, що при координованій роботі засобів регулювання напруги без налаштувань та роботою ДРГ в режимі регулювання напруги (Дослід №3) сумарні втрати активної енергії в мережі зменшуються на 20,5% у порівнянні з некоординованою роботою (Дослід №2).

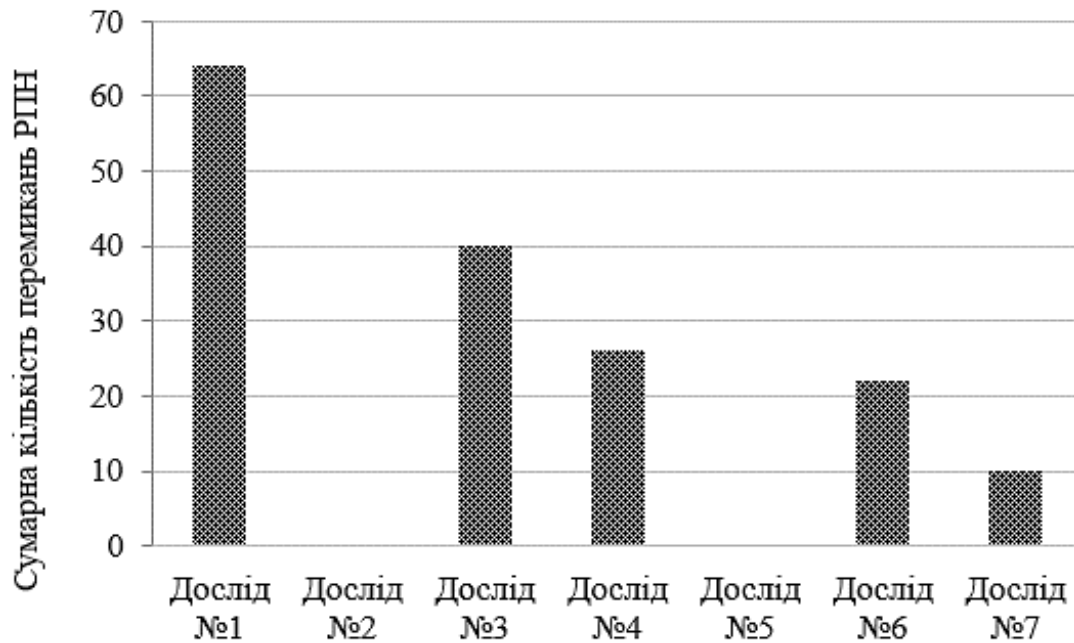


Рис.5. Сумарна кількість перемикачів положення РПН трансформаторів

За тих же умов, але з використанням налаштувань (Дослід №4) сумарні втрати активної енергії в мережі зменшуються ще на 6,7%. Слід зазначити, що у Досліді №1 напруга в контрольованих вузлах порушує допустимі границі.

У той же час сумарна енергія ДРГ майже не змінюється - рис.4. При цьому координована робота системи керування різнотипними засобами регулювання напруги з використанням налаштувань (Дослід №4) дозволяє знизити сумарну кількість перемикачів систем РПН трансформаторів на 14 перемикачів, у порівнянні з випадком координованої роботи засобів регулювання без використання коефіцієнтів налаштувань (Дослід №3) - рис.5.

Встановлено, що при координованій роботі засобів регулювання напруги при роботі ДРГ в режимі регулювання коефіцієнта потужності, як з використанням коефіцієнтів налаштувань, так і без налаштувань (Досліди №6 і №7) сумарні втрати активної енергії в мережі зменшуються на 22% у порівнянні з випадком некоординованої роботи (Дослід №5). У той же час сумарна енергія ДРГ при координованій роботі засобів регулювання, як з використанням коефіцієнтів налаштувань, так і без налаштувань (Досліди №6 і №7), зростає на 3% у порівнянні з некоординованою роботою (Дослід №5) - рис.4. При цьому координована робота системи керування різнотипними засобами регулювання напруги з налаштуваннями (Дослід №7) дозволяє знизити сумарну кількість перемикачів систем РПН трансформаторів в 2 рази, у порівнянні з випадком координованої роботи засобів регулювання без налаштувань (Дослід №6) - рис.5. Напруги у вузлах РЕМ в наведених випадках (Досліди №3, №4, №6 і №7) перебувають в допустимих межах.

На основі проведеного аналізу результатів досліджень встановлено, що застосування розробленої системи координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги з налаштуваннями підвищує ефективність регулювання напруги в РЕМ з ДРГ.

На основі аналізу коефіцієнтів чутливості по напрузі розроблено метод пошуку трансформаторів, РПН яких має найбільший вплив на напругу у вузлах мережі.

Основні етапи розробленого методу мають наступну послідовність:

- Розрахунок чутливості напруги в РЕМ відносно зміни активної потужності ДРГ $\frac{\partial U_v}{\partial P_{ДРГg}}$ та визначення вузлів з найбільшою чутливістю:

$$\frac{\partial U_v}{\partial P_{ДРГg}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial P_{ДРГ1}} & \frac{\partial U_2}{\partial P_{ДРГ1}} & \dots & \frac{\partial U_v}{\partial P_{ДРГ1}} \\ \frac{\partial U_1}{\partial P_{ДРГ2}} & \frac{\partial U_2}{\partial P_{ДРГ2}} & \dots & \frac{\partial U_v}{\partial P_{ДРГ2}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial U_1}{\partial P_{ДРГg}} & \frac{\partial U_2}{\partial P_{ДРГg}} & \dots & \frac{\partial U_v}{\partial P_{ДРГg}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

- Розрахунок чутливості напруги в вузлах РЕМ відносно зміни положення РПН n-го трансформатора $\frac{\partial U_v}{\partial N_{РПНn}}$:

$$\frac{\partial U_v}{\partial N_{РПНn}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial N_{РПН1}} & \frac{\partial U_2}{\partial N_{РПН1}} & \dots & \frac{\partial U_v}{\partial N_{РПН1}} \\ \frac{\partial U_1}{\partial N_{РПН2}} & \frac{\partial U_2}{\partial N_{РПН2}} & \dots & \frac{\partial U_v}{\partial N_{РПН2}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial U_1}{\partial N_{РПНn}} & \frac{\partial U_2}{\partial N_{РПНn}} & \dots & \frac{\partial U_v}{\partial N_{РПНn}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

- На основі аналізу розрахованих коефіцієнтів чутливості визначаються трансформатори з РПН, які мають вплив на найбільшу кількість вузлів серед чутливих вузлів відносно зміни активної потужності ДРГ.

Встановлено, що застосування запропонованого методу дозволяє зменшити сумарну кількість спрацювань систем РПН трансформаторів.

Досліджено вплив місць розміщення ДРГ та засобів регулювання напруги на ефективність роботи розробленої системи керування. Встановлено, що використання розробленої системи при розміщенні засобів регулювання напруги у вузлах, визначених на основі аналізу чутливості або за методом «Багатокритеріального показника» дозволяє зменшити сумарні втрати активної енергії в мережі на 3,5% та сумарну кількість спрацювань систем РПН трансформаторів в 2 рази при роботі ДРГ в режимі регулювання коефіцієнта потужності. За тих самих умов при роботі ДРГ в режимі регулювання напруги сумарні втрати активної енергії в мережі збільшуються на 4%, але сумарна кількість перемикачів положення систем РПН трансформаторів зменшується в 6 разів. На зміну вихідної сумарної енергії ДРГ зміна розміщення засобів регулювання якісно не впливає.

У **четвертому розділі** досліджено вплив зміни кількості засобів регулювання напруги, збільшення кількості ДРГ, а також зміни схеми мережі на

ефективність роботи розробленої системи координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги. Дослідження проводились у вихідних умовах, наведених в табл.1 для дослідів №2-№7.

Порівняльна характеристика зміни сумарної виробленої енергії ДРГ та сумарних втрат активної енергії в мережі при збільшенні кількості трансформаторів з РПН вдвічі у різних вихідних умовах наведена на рис.6, а характеристику зміни сумарної кількості перемикачів положення систем РПН трансформаторів наведено на рис.7.

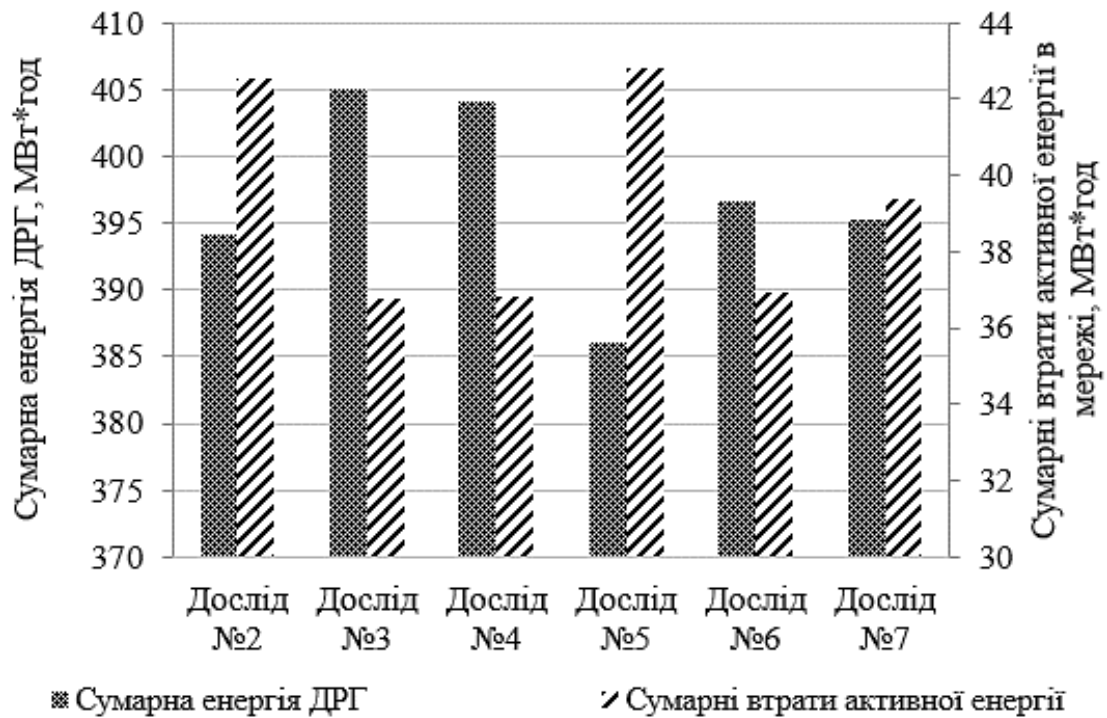


Рис.6. Сумарні енергія ДРГ та втрати активної енергії в РЕМ, МВт*год

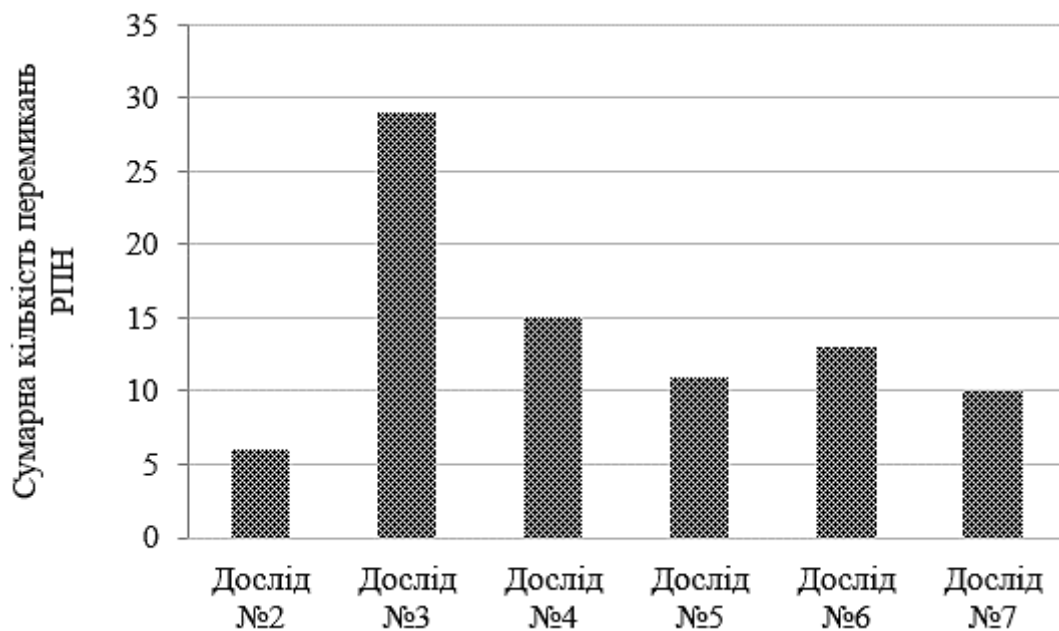


Рис.7. Сумарна кількість перемикачів положення РПН трансформаторів

Аналіз ефективності роботи розробленої системи керування показав, що при збільшенні кількості трансформаторів з РПН в 2 рази сумарна вироблена

енергія ДРГ збільшується на 3%, сумарні втрати активної енергії в мережі зменшуються на 8-14%. При цьому у випадку роботи ДРГ в режимі регулювання напруги застосування налаштувань системи координованого регулювання дозволяє зменшити сумарну кількість перемикачів систем РПН трансформаторів в 2 рази. Отримані результати досліджень показали, що кількість трансформаторів з РПН, яку слід залучати до системи координованого регулювання напруги залежить від співвідношення потужності ділянки РЕМ та потужності ДРГ, приєднаних до неї.

На основі результатів аналізу ефективності роботи розробленої системи керування встановлено, що при збільшенні кількості ДРГ, залучених до системи, на 1 станцію сумарні втрати активної енергії в мережі зменшуються на 2,2%, сумарна вироблена енергія ДРГ збільшується на 1%, сумарна кількість перемикачів систем РПН трансформаторів зменшується на 30%.

Також встановлено, що при зміні схеми РЕМ застосування розробленої системи керування дозволяє збільшити сумарну енергію ДРГ на 2%, зменшити сумарні втрати активної енергії в мережі на 2,3% та сумарну кількість перемикачів РПН трансформаторів на 40%.

Проведений аналіз результатів досліджень дозволяє підтвердити ефективність застосування розробленої системи координованого керування з визначеними налаштуваннями.

Сформовано вимоги до інформаційного забезпечення розробленої системи координованого регулювання напруги в РЕМ з ДРГ. Встановлено, що технологічну інформацію доцільно поділяти на «базову» та «поточну». «Базова» інформація оновлюється з частотою, що відповідає частоті зміни стану обладнання та конфігурації мережі. «Поточна» інформація повинна оновлюватись з встановленою періодичністю, яку визначено виходячи зі ступеню важливості області РЕМ, що контролюється системою керування.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі наведено нове вирішення актуального науково-прикладного завдання підвищення ефективності регулювання напруги в РЕМ з ДРГ шляхом координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги в умовах змінного генерування ДРГ.

Виконані дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Проведений аналіз існуючих підходів та методів регулювання напруги в РЕМ з ДРГ дозволив виділити їх основні недоліки, серед яких: збільшення втрат потужності в РЕМ, зменшення терміну експлуатації засобів регулювання напруги та зменшення вихідної активної потужності ДРГ. Аналіз виявлених недоліків свідчить про необхідність підвищення ефективності регулювання напруги в РЕМ з ДРГ шляхом координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги з залученням РПН трансформаторів, засобів компенсації реактивної потужності та ДРГ.

2. На основі досліджень властивостей елементів РЕМ, розроблено математичні моделі, алгоритми роботи та структурні схеми підсистем керування потужністю ДРГ, реактивною потужністю СТК та систем керування РПН

трансформаторів. Аналіз результатів досліджень впливу ДРГ на режими роботи РЕМ показав, що підключення ДРГ до РЕМ збільшує сумарну кількість спрацювань систем РПН трансформаторів в 2 рази та призводить до порушення допустимих меж по напрузі в контрольних вузлах. Результати проведених досліджень обумовлюють необхідність поєднання регулювання потужності ДРГ, роботи РПН трансформаторів та інших засобів регулювання напруги, таких як СТК.

3. Сформовано критерій оптимального регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, який мінімізує втрати потужності в мережі та кількість перемикачів систем РПН трансформаторів при максимізації вихідної активної потужності ДРГ. З використанням запропонованого критерію розроблено метод координованого керування, на основі якого розроблено систему керування різнотипними засобами регулювання напруги, а саме РПН трансформаторів, СТК та ДРГ.

4. На основі аналізу результатів дослідження роботи розробленої системи керування встановлено, що при роботі ДРГ в режимі регулювання коефіцієнта потужності вихідна активна потужність генерування ДРГ збільшується на 3%, сумарні втрати активної енергії в мережі зменшуються на 22%, кількість перемикачів систем РПН трансформаторів зменшується в 2 рази, що свідчить про ефективність застосування розробленого методу.

5. З використанням аналізу коефіцієнтів чутливості по напрузі розроблено метод пошуку трансформаторів, РПН яких має найбільший вплив на напругу у вузлах мережі. Встановлено, що запропонований метод дозволяє зменшити сумарну кількість спрацювань систем РПН трансформаторів.

6. Проведений аналіз результатів дослідження впливу місць розміщення ДРГ та засобів регулювання напруги на ефективність роботи розробленої системи керування показав, що використання розробленої системи при розміщенні засобів регулювання напруги у вузлах, визначених на основі аналізу чутливості або за методом «Багатокритеріального показника», дозволяє зменшити сумарні втрати активної енергії в мережі на 3,5% та сумарну кількість спрацювань систем РПН трансформаторів в 2 рази при роботі ДРГ в режимі регулювання коефіцієнта потужності. При роботі ДРГ в режимі регулювання напруги вибір та розміщення засобів регулювання у визначених вузлах призводить до збільшення сумарних втрат активної енергії в мережі на 4%, але дозволяє зменшити сумарну кількість перемикачів положення систем РПН трансформаторів в 6 разів.

7. Аналіз ефективності роботи розробленої системи керування показав, що при збільшенні кількості трансформаторів з РПН в 2 рази та збільшенні кількості ДРГ, залучених до координованого регулювання, застосування розробленої системи керування дозволяє збільшити сумарну вироблену енергію ДРГ на 1-3%, зменшити сумарні втрати активної енергії в мережі на 2-14% та зменшити сумарну кількість перемикачів систем РПН трансформаторів на 30-50%. При зміні схеми РЕМ застосування розробленої системи керування дозволяє збільшити сумарну енергію ДРГ на 2%, зменшити сумарні втрати активної енергії в мережі на 1-4% та сумарну кількість перемикачів РПН трансформаторів на 40%.

8. Сформовано вимоги до інформаційного забезпечення розробленої системи координованого регулювання напруги в РЕМ з ДРГ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Матеріали дисертаційної роботи викладено в таких опублікованих наукових працях:

1. Марченко А.А., Труніна Г.О., Тимохіна А.О. Моделювання регулятора напруги розподільної електричної мережі. *Вісник Чернігівського державного Технологічного Університету. Технічні науки*. Чернігів, 2013. №2(65). С.209-215. Особистий внесок: дослідження роботи БСК у складі електричної мережі, розробка імітаційної моделі регулятора напруги з використанням тиристорно-комутованих БСК.

2. Яндульський О.С., Труніна Г.О. Підходи до оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженою генерацією. *Вісник Вінницького політехнічного Інституту*. Вінниця, 2013. №6. С.62-64. Особистий внесок: аналіз підходів до оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з ДРГ, формування критерію оптимальності, що враховує погіршення якості електроенергії через відхилення напруги в мережі.

3. Труніна Г.О. Зони ефективного регулювання напруги джерелами розосередженої генерації з інверторним приєднанням в розподільній електричній мережі. *Технічна електродинаміка*. Київ, 2014. №5. С. 50-52. (включено до міжнародної наукометричної бази даних Scopus) Особистий внесок: розробка підходу до визначення зон ефективного регулювання напруги ДРГ з інверторним приєднанням в РЕМ на основі розрахунку і аналізу коефіцієнтів чутливості вузлів по напрузі.

4. Яндульський О.С., Труніна Г.О. Визначення зон ефективного регулювання напруги джерелами розосередженої генерації з інверторним приєднанням в розподільній електричній мережі. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. Вінниця, 2014. № 4. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/422/420> (дата звернення: 20.06.2018).

Особистий внесок: дослідження впливу зміни положення РПН трансформаторів на коефіцієнти чутливості в вузлах РЕМ відносно зміни потужності ДРГ.

5. Яндульський О.С., Труніна Г.О. Підхід до оптимального регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелом розосередженої генерації з урахуванням їх належності одному або різним власникам. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. Маріуполь, 2015. №30 (Т.2). С. 121-129.

Особистий внесок: формування критеріїв оптимального регулювання напруги в РЕМ з ДРГ у випадках їх належності одному або різним власникам з урахуванням особливостей регулювання напруги за допомогою ДРГ та системи РПН трансформатора.

6. Яндульський О.С., Тимохін О.В., Труніна Г.О., Нестерко А.Б. Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних перехідних

процесів в електроенергетичній системі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2015. №6(123). С. 129-135.

Особистий внесок: аналіз режимів енергосистеми на основі даних СМІР, проведення кластеризації для ряду тестових сценаріїв.

7. Яндульський О.С., Нестерко А.Б., Труніна Г.О., Тимохін О.В. Зменшення кількості спрацювань системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генерування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2017. №5. С.69-73. (включено до міжнародних наукометричних баз даних Index Copernicus та РИНЦ)

Особистий внесок: розробка підходу до координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги, що базується на визначенні коефіцієнтів чутливості напруги у вузлах РЕМ відносно зміни реактивної потужності засобів регулювання, що входять до складу системи керування.

8. Яндульський О.С., Нестерко А.Б., Труніна Г.О. Зменшення кількості перемикачів системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генерування. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2017. №3(104). Частина 1. С. 33-38. (включено до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus)

Особистий внесок: дослідження роботи системи РПН трансформатора в РЕМ з ДРГ, розробка системи координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги, формування моделі регулятора положення системи РПН трансформатора.

9. Яндульський О.С., Нестерко А.Б., Труніна Г.О. Координоване регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелами розосередженого генерування. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. Маріуполь, 2017. №35. С. 177-184.

Особистий внесок: розробка системи координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги з залученням ДРГ, які мають здатність регулювати напругу в вузлі підключення.

10. Яндульський О.С., Труніна Г.О., Нестерко А.Б. Оптимальне регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелом розосередженого генерування з урахуванням їх належності одному власнику при використанні резерву активної потужності. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2015. №2(91). С.50-54.

11. Яндульський О.С., Марченко А.А., Труніна Г.О., Нестерко А.Б. Визначення резервів активної потужності джерел розосередженого генерування з урахуванням їх впливу на напругу в мережі. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. Київ, 2016. №1(43). С.13.

12. Яндульський О.С. Підходи до оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженою генерацією / О.С. Яндульський, Г.О. Труніна // ОКЕУ 2013 Оптимальне керування електроустановками. II Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 22-24 жовтня 2013р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.120.

13. Труніна Г.О. Зони ефективного регулювання напруги за допомогою джерел розосередженої генерації з інверторним приєднанням в розподільній електричній мережі // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки – 2014» (ПСЕ-2014). Тези доповідей. 2-6 червня 2014р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ – видання на CD-диску

14. Яндульський О.С. Визначення зон ефективного регулювання напруги джерелами розосередженої генерації з інверторним приєднанням в розподільній електричній мережі / О.С. Яндульський, Г.О. Труніна // V Міжнародна науково-технічна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». Тези доповідей. 29 червня – 2 липня 2014р. Луцький національний технічний університет, Луцьк-Шацькі озера – С.214-215.

15. Труніна Г.О. Керування режимами розподільної електричної мережі за допомогою сонячної електростанції / Г.О. Труніна, А.Б. Нестерко // XV Ювілейна міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика XXI століття». Тези доповідей. 16-17 вересня 2014р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Кафедра відновлюваних джерел енергії, Київ – С.101-103.

16. Яндульський О.С. Підхід до оптимального регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелом розосередженої генерації з урахуванням їх належності одному або різним власникам / О.С. Яндульський, Г.О. Труніна // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» Тези доповідей. 20-24 квітня 2015 р. ДВНЗ «ПДТУ», Маріуполь – С.30-31.

17. Яндульський О.С. Визначення резервів активної потужності відновлюваних джерел енергії / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна // XVI міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Тези доповідей. 28-29 травня 2015 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Кафедра відновлюваних джерел енергії, Київ – С.17.

18. Яндульський О.С. Визначення резервів активної потужності відновлюваних джерел енергії з урахуванням їх впливу на напругу в мережі / О.С. Яндульський, А.А. Марченко, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна // Четверта міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи - ESS'15». Тези доповідей. 9-12 червня 2015р., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ – видання на CD-диску

19. Яндульський О.С. Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних перехідних процесів в електроенергетичній системі / О.С. Яндульський, О.В. Тимохін, Г.О. Труніна, А.Б. Нестерко // ОКЕУ 2015 Оптимальне керування електроустановками. III Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 14-15 жовтня 2015р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.66.

20. Яндульський О.С. Залучення відновлюваних джерел енергії до регулювання частоти та потужності електроенергетичної системи / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна // ОКЕУ 2015 Оптимальне керування електроустановками. III Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 14-15 жовтня 2015р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – С.67.

21. Яндульський О.С. Вплив відновлюваних джерел енергії з інверторним приєднанням на інерцію електроенергетичної системи / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна // XVII міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Тези доповідей. 29-30 вересня 2016 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Кафедра відновлюваних джерел енергії, Київ – С.168-171.

22. Яндульський О.С. Координоване регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелами розосередженого генерування / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна // XVIII міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Тези доповідей. 27-29 вересня 2017 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Кафедра відновлюваних джерел енергії, Київ – С.143-146

23. Яндульський О.С. Зменшення кількості спрацювань системи РПН трансформатора в електричній мережі з джерелами розосередженого генерування / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна, О.В. Тимохін // ОКЕУ 2017 Оптимальне керування електроустановками. IV Міжнародна науково-технічна конференція. Тези доповідей. 11-13 жовтня 2017 р. Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

24. Яндульський О.С. Оптимальне регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелами розосередженого генерування / О.С. Яндульський, А.Б. Нестерко, Г.О. Труніна, В.С. Гулий // XIX міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Тези доповідей. 26-28 вересня 2018 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Кафедра відновлюваних джерел енергії, Київ – С.107-110.

АНОТАЦІЯ

Труніна Г.О. Підвищення ефективності регулювання напруги в розподільних електричних мережах з розосередженим генеруванням. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання підвищення ефективності регулювання напруги в РЕМ з

ДРГ шляхом координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги в умовах змінного генерування ДРГ.

На основі проведеного аналізу методів регулювання напруги в електричних мережах радіального типу напругою 110/35/10 кВ з ДРГ виявлено, що існуючі методи регулювання напруги мають ряд недоліків, які негативно впливають на ефективність роботи ДРГ зі змінним характером генерування.

Розроблено математичні моделі, алгоритми роботи та структурні схеми підсистем керування потужністю ДРГ, реактивною потужністю СТК та систем керування РПН трансформаторів. Сформовано критерій оптимального регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, який мінімізує сумарні втрати активної енергії в мережі та кількість перемикачів положення систем РПН трансформаторів при максимізації вихідної активної потужності ДРГ. З використанням запропонованого критерію розроблено систему керування різнотипними засобами регулювання напруги, такими як РПН трансформаторів, СТК та ДРГ. Проведений аналіз результатів дослідження показав, що застосування розробленої системи керування дозволяє підвищити ефективність регулювання напруги в РЕМ з ДРГ.

Ключові слова: втрати потужності, джерела розосередженого генерування, оптимізація, реактивна потужність, регулювання напруги, розподільна електрична мережа, система регулювання під навантаженням трансформатора, статичні тиристорні компенсатори.

ABSTRACT

Trunina H. Increasing the efficiency of voltage regulation in distributed electric networks with distributed generation. – On the rights of manuscripts.

The thesis submitted in fulfilment of the Candidate of Engineering Science (PhD) degree in technical sciences on specialty 05.14.02 - Electric power stations, networks and systems. The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to the decision of the actual scientific and applied task of increasing the efficiency of voltage regulation in DEN with DGS by optimal control of various types of voltage regulation in the conditions of alternating generating of DGS. On the basis of the analysis of methods of voltage regulation in electric networks of radial type with voltage 110/35/10 kV with DGS it was revealed that existing methods of voltage regulation have a number of shortcomings that adversely affect the efficiency of DGS with variable generating character in the composition of DEN. The mathematical models, algorithms of work and structural schemes of power control subsystems of DGS, reactive power of SVC and control systems of voltage transformer transformers are developed. The criterion of the optimization of voltage regulation in the DEN with DGS is formed, which minimizes power losses in the network and the number of switching positions of the systems of the transformer voltage transformers at the maximization of the output power of the DGS. Using the proposed criterion a co-ordinated control method was developed, on the basis of which a control system for various types of voltage regulation devices, such as transformer transformers, SVC and DGS, was developed. The conducted analysis of the results of

the study showed that the application of the developed control system allows to increase the efficiency of voltage regulation in the DEN with DGS.

Keywords: power losses, distributed generation sources, optimization, reactive power, voltage regulation, distribution network, static var compensators.

АННОТАЦИЯ

Трунина А.А. Повышение эффективности регулирования напряжения в распределительных электрических сетях с рассредоточенным генерированием. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - Электрические станции, сети и системы. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2018.

В работе приведено новое решение актуальной научно-прикладной задачи повышения эффективности регулирования напряжения в распределительной электрической сети (РЭС) с источниками рассредоточенного генерирования (ИРГ) путем координированного управления средствами регулирования напряжения в условиях переменного генерирования ИРГ.

В работе проведен анализ классификации ИРГ по степени управляемости и типу исполнения генератора. Определено, что наибольший интерес для исследований представляют условно-управляемые источники на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Тенденция к использованию таких источников основывается на необходимости повышения надежности и качества энергоснабжения при уменьшении загрязнения окружающей среды и затрат на выработку, передачу и распределение электроэнергии.

Установлено, что существующие подходы и методы регулирования напряжения в РЭС с ИРГ приводят к повышению потерь мощности в РЭС, уменьшению срока эксплуатации средств регулирования напряжения и уменьшению выходной активной мощности ИРГ. Анализ выявленных недостатков свидетельствует о необходимости повышения эффективности регулирования напряжения в РЭС с ИРГ, путем координированного управления разнотипными средствами регулирования напряжения.

В работе разработаны математические модели, алгоритмы работы и структурные схемы подсистем управления мощностью ИРГ, реактивной мощностью СТК и систем управления РПН трансформаторов.

Проведено исследование влияния ИРГ на работу РПН трансформаторов и напряжение в узлах РЭС. Установлено, что подключение ИРГ в РЭС увеличивает суммарное количество срабатываний систем РПН трансформаторов в 2 раза и приводит к нарушению допустимых пределов по напряжению в контрольных узлах.

Сформирован критерий оптимального регулирования напряжения в РЭС с ИРГ, который минимизирует потери мощности в сети и количество переключений положения систем РПН трансформаторов при максимизации выходной активной мощности ИРГ. С использованием предложенного критерия разработан метод координированного управления, на основе которого

разработана система управления разнотипными средствами регулирования напряжения, такими как РПН трансформаторов, СТК и ИРГ.

Анализ результатов исследования работы разработанной системы управления показал, что выходная активная мощность генерации ИРГ увеличивается на 3%, потери мощности в сети уменьшаются на 22%, количество переключений систем РПН трансформаторов уменьшается в 2 раза, что свидетельствует об эффективности работы разработанного метода.

Разработан метод поиска трансформаторов, РПН которых оказывает наибольшее влияние на напряжение в узлах сети. Установлено, что предложенный метод позволяет уменьшить суммарное количество срабатываний систем РПН трансформаторов.

Исследовано влияние мест размещения ИРГ и выбора средств регулирования напряжения на эффективность работы разработанной системы управления. Установлено, что использование разработанной системы при размещении средств регулирования напряжения в определенных узлах позволяет уменьшить суммарные потери мощности в сети на 3,5% и суммарное количество срабатываний систем РПН трансформаторов в 2 раза при работе ИРГ в режиме регулирования коэффициента мощности. При работе ИРГ в режиме регулирования напряжения оптимальный выбор и размещение средств регулирования приводит к увеличению суммарных потерь мощности в сети на 4% и уменьшению суммарного количества переключений РПН в 6 раз.

Анализ эффективности работы разработанной системы управления показал, что увеличение количества трансформаторов с РПН в 2 раза и увеличение количества ИРГ, привлеченных к системе позволяет увеличить суммарную произведенную энергию ИРГ на 1-3%, уменьшить потери мощности в сети на 2-14% и уменьшить суммарное количество переключений систем РПН трансформаторов на 30-50%. При изменении схемы РЭС применение разработанной системы управления позволяет увеличить суммарную энергию ИРГ на 2%, уменьшить потери мощности в сети на 1-4% и суммарное количество переключений РПН трансформаторов на 40%.

Сформированы требования к информационному обеспечению разработанной системы координированного регулирования в РЭС с ИРГ.

Ключевые слова: потери мощности, источники рассредоточенного генерирования, оптимизация, реактивная мощность, регулирования напряжения, распределительная электрическая сеть, система регулирования под нагрузкой трансформатора, статические тиристорные компенсаторы.

Підписано до друку 25.02.2019 р. Формат 60х84/16. Папір офс. Гарнітура Times.
Спосіб друку – цифровий. Ум. друк. арк. 1,63. Наклад 150 пр.
Зам. № 19-58.

ФО-П Маслаков Руслан Олексійович
Свідоцтво ДК № 4726 від 29.05.2014 р.
Видавничий дім “Освіта України”
04136, Київ, вул. Маршала Гречка, 13, оф.808
тел. (095) 699-25-20